

ЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 536.24

ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ТЕПЛООБМЕНУ ПРИ КИПЕНИИ ПРОПАНА НА МЕДНЫХ СПЕЧЕННЫХ КАПИЛЛЯРНО- ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЯХ

Л.Л. ВАСИЛЬЕВ

*АНК Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова
НАН Беларуси, Республика Беларусь*

А.В. ОВСЯННИК, М.Н. НОВИКОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Получено критериальное уравнение, обобщающее экспериментальные данные по кипению пропана на медных спеченных пористых покрытиях в широком диапазоне плотностей теплового потока, давлений паров насыщения и параметров пористого покрытия. Показана перспективность применения пропана как теплоносителя в сравнении с озоноразрушающими фреонами.

Введение

При создании высокоэффективных и компактных теплообменных аппаратов необходимо знать не только основные закономерности теплообмена при кипении на пористых структурах, но и иметь достаточно простые соотношения, позволяющие с точностью, приемлемой для инженерных расчетов, определить коэффициенты теплоотдачи в заданном диапазоне рабочих параметров. В литературе имеется ряд эмпирических зависимостей по теплоотдаче для разнообразных пористых покрытий, однако, в большинстве случаев сложность однозначного определения некоторых параметров, входящих в результирующие выражения, затрудняет их использование. Кроме того, часть соотношений имеет крайне узкую область применения, не представляющую большого практического интереса. Аналитическое решение задачи о теплообмене при кипении представляется весьма проблематичным из-за большого количества факторов, влияющих на процесс, а также сложной взаимосвязи между ними. Трудным оказывается также получение приближенной эмпирической зависимости, имеющей ясный физический смысл. Поэтому при проведении анализа нужно опираться на бесспорно установленные экспериментальные факты и рассматривать наиболее существенные для данного процесса связи.

1. Постановка задачи и граничные условия

Механизм процесса теплообмена между обогреваемой поверхностью и жидкостью представляется периодически протекающими с определенной амплитудой и частотой элементарными актами. Вызываемые ими сильные колебания температуры соприкасающихся слоев жидкости приводят к существенной неравномерности полей температур в каждой точке поверхности. Сложность и особенность процесса пузырькового кипения на поверхности заключается в его двойственности – периодичности и нестационарности его в отдельных точках поверхности и стационарности

процесса в целом (при постоянной плотности теплового потока). Особенность теплообмена при кипении в условиях большого объема состоит также в том, что перемещение жидкости является результатом самого процесса, и скорость движения жидкости не может быть задана заранее. Вид основных критериев (чисел подобия) определяется из известной системы дифференциальных уравнений, описывающий нестационарный конвективный теплообмен, в которую входят: уравнение неразрывности (1), уравнение движения жидкости (2), уравнение энергии (3), уравнение теплообмена на границе теплоотдающая поверхность–жидкость (4):

$$\operatorname{div} \mathbf{w} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{w}}{\partial \tau} + (\mathbf{w} \operatorname{grad}) \mathbf{w} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \nabla^2 \mathbf{w}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + (\mathbf{w} \operatorname{grad}) T = a \nabla^2 T; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = -\frac{\alpha}{\lambda} \Delta T. \quad (4)$$

Числа подобия, которые получаются из системы уравнений (1)-(4), в общей форме известны:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}; \quad Pe = \frac{w l}{a}; \quad Fo = \frac{a \phi}{l^2}; \quad Pr = \frac{\nu}{a}; \quad Gr = \frac{g l^3 \beta \Delta T}{\nu^2}; \quad Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2}.$$

Не все числа подобия в данном случае являются определяющими. Критерии Эйлера и Грасгофа можно не учитывать, так как величина Δp не может быть задана заранее и влияние сил тяжести, связанных с температурным расширением жидкости, пренебрежимо мало по сравнению с силами инерции и вязкости. Следовательно, определяющими критериями подобия в представленной системе дифференциальных уравнений будут числа Пекле, Фурье и Прандтля и определяемым – критерий Нуссельта.

Для конкретизации поставленной задачи (описание теплоотдачи при кипении) необходимо к системе уравнений (1)-(4) добавить условия, отражающие специфику данного вида теплообмена. Процесс кипения определяется следующими условиями и соответствующими им заранее заданными величинами [1-3]: физическими свойствами жидкости и ее пара, зависящими от рода жидкости и давления, и, в общем случае, свойствами поверхности нагрева, температурой стенки T_{cm} , то есть температурным напором ΔT (условие первого рода), либо плотностью теплового потока на стенке q (условия второго рода). Оба способа по существу равнозначны, но от выбора задания ΔT или q будет зависеть форма и комбинация определяющих чисел. Наиболее часто для практических расчетов и обобщения экспериментальных данных используется второй способ – задание тепловой нагрузки поверхности нагрева.

При такой постановке задачи, изначально заданными можно считать плотность теплового потока q , а также физические свойства жидкости (при заданном давлении насыщения). В этом случае, отношение $q/r\rho_n$ имеет размерность скорости и имеет строго заданное значение, в отличие от скорости движения жидкости. Величина $q/r\rho_n$ является специфическим параметром для теплообмена при кипении, которая называется приведенной скоростью парообразования, и ее включение в условия однозначности является необходимым.

Одним из основных вопросов, возникающих при определении критериев подобия, является вопрос о выборе характерного линейного размера. Таким размером не может быть линейный размер поверхности нагрева, поскольку обычно рассматривается задача кипения на поверхности больших размеров значительно превышающей размер паровых пузырей. Отсутствие существенного влияния высоты слоя жидкости на интенсивность теплообмена при кипении также доказана в ряде экспериментальных работ [1, 4, 5]. Критический радиус зародыша $R_{кр}$ зависит от температурного напора (или от плотности теплового потока) и тоже, следовательно, не может быть принят как характерный линейный размер. Возможно, единственной величиной, на которую практически не влияет плотность теплового потока, по мнению авторов [1-3, 6], является среднее значение отрывного диаметра пузыря. Тогда критерий Пекле запишется в виде:

$$Pe = \frac{q d_0}{r \rho_n a}. \quad (5)$$

На основании анализа проведенного в [1], в первом приближении, частоту отрыва паровых пузырей можно считать величиной, также не зависящей от плотности теплового потока – $f(q) = 1/\tau \approx const$. Где τ – время полного цикла образования паровых пузырей на поверхности нагрева. При принятых допущениях критерий Фурье для пузырькового кипения будет:

$$F_0 = \frac{a \tau}{d_0^2} = \frac{a}{d_0^2 f}. \quad (6)$$

Критерий Прандтля является функцией физических свойств жидкости, не является специфическим и фигурирует во всех уравнениях конвективного теплообмена:

$$Pr = \frac{\nu}{a}. \quad (7)$$

Процесс теплообмена при кипении отличается от конвективного теплообмена существованием двухфазного пристенного слоя. В этом случае необходимо учитывать действие поверхностных сил. Для технически гладкой поверхности наличие поверхностных сил можно учесть с помощью капиллярной постоянной жидкости:

$$l_0 = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{ж} - \rho_{жс})}}. \quad (8)$$

Тогда определяемый критерий Нуссельта для гладкой поверхности можно записать:

$$Nu = \frac{\delta l_0}{l_{жс}}. \quad (9)$$

В случае развитого кипения внутри изотропного капиллярного покрытия размер наиболее многочисленных каналов для выхода пара определяется геометрией структуры и является практически постоянной величиной, не зависящей от плотности теплового потока. Поэтому за характерный линейный размер можно принять средний гидравлический размер пор \bar{d}_0 , характеризующий транспортную способность пористого материала при полном насыщении его рабочей жидкостью. С учетом вышесказанного, критерий Нуссельта можно записать в следующем виде:

$$Nu = \frac{\bar{\delta} \bar{d}_0}{\lambda_{жс}}. \quad (10)$$

2. Обобщение экспериментальных данных

В данной работе рассматривается задача определения интенсивности теплоотдачи при кипении. В этом случае искомой величиной является коэффициент теплоотдачи α , а определяемым критерием – критерий Нуссельта. В монографии Толубинского В.И. [1] для гладкой поверхности, без учета свойств последней, решение этой задачи было получено в виде:

$$Nu = CK^m Pr^n, \quad (11)$$

где значения C , m , n – находятся на основании экспериментальных данных.

Критерий K – специфический критерий, различный для различных видов конвективного теплообмена: для свободной конвекции – это число Грасгофа или Архимеда, для вынужденного движения – критерий Пекле или Рейнольдса. Для теплообмена при кипении этот критерий можно записать в виде:

$$K = Pe \cdot Fo = \frac{q}{r\rho_n d_0 f} = \frac{q}{r\rho_n \omega''}, \quad (12)$$

где d_0 – отрывной диаметр пузыря; f – частота отрыва паровых пузырей; ω'' – скорость роста паровых пузырей, характеризующая среднюю скорость роста последних в данной точке и паропроизводительность одного центра парообразования.

Принципиальное отличие этого критерия состоит в том, что он составлен из внутренних характеристик процесса пузырькового кипения, отражающих специфические особенности данного процесса. Усредненные значения внутренних характеристик d_0, f , а в большей степени ω'' , можно считать практически не зависящими от плотности теплового потока q в широком диапазоне изменения последнего, что подтверждается результатами работ [7-10]. Влияние плотности теплового потока на внутренние характеристики кипения метилового спирта по экспериментальным данным [9] представлено на рис. 1.

На основании проведенных экспериментов автором [1], в соответствии с уравнением (11), была предложена обобщающая зависимость, описывающая известные данные по кипению неметаллических жидкостей с погрешностью достаточной для практических расчетов:

$$Nu = 75 \cdot K^{0,7} Pr^{-0,2}, \quad (13)$$

или в развернутом виде

$$\frac{\alpha}{\lambda_{жс}} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{жс} - \rho_n)}} = 75 \cdot \left(\frac{q}{r\rho_n \omega''} \right)^{0,7} \cdot \left(\frac{\nu}{a} \right)^{-0,2}. \quad (14)$$

Значения ω'' предлагается рассчитывать по эмпирической зависимости:

$$\omega'' = 0,36 \cdot 10^{-3} \cdot \pi^{-1,4}, \quad (15)$$

где $\pi = p/p_{кр}$ – приведенное давление.

При кипении жидкостей в капиллярно-пористой структуре необходимо учитывать свойства поверхности нагрева. Это связано с определяющим влиянием

геометрических характеристик поверхности на интенсивность теплоотдачи. На основании анализа литературных данных и проведенных экспериментальных исследований можно прийти к выводу, что наиболее существенное влияние при кипении на пористой поверхности оказывает толщина пористого покрытия, пористость, размер пор и функция распределения пор по размерам. Влияние трех последних факторов можно свести к одному – влиянию среднего гидравлического размера пор, являющегося функцией этих важнейших характеристик капиллярной структуры. Замечено, что при представлении экспериментальных данных в виде зависимости $\alpha = f(\delta_{kc}/\bar{d}_0)$ (рис. 2), максимум коэффициента теплоотдачи практически всегда достигается при определенном соотношении δ_{kc}/\bar{d}_0 , лежащем в пределах $11 \div 12,5$ и не зависит от размера фракции.

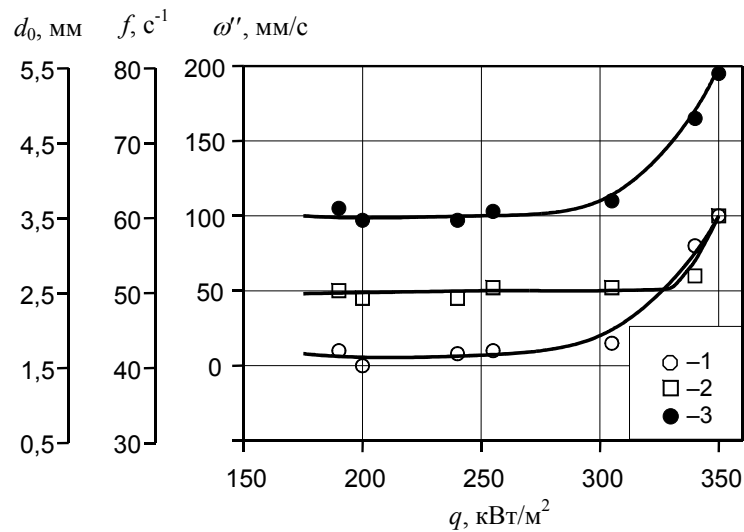


Рис. 1. Влияние плотности теплового потока на внутренние характеристики кипения метилового спирта по данным [9]: 1– d_0 , 2– f , 3– ω'

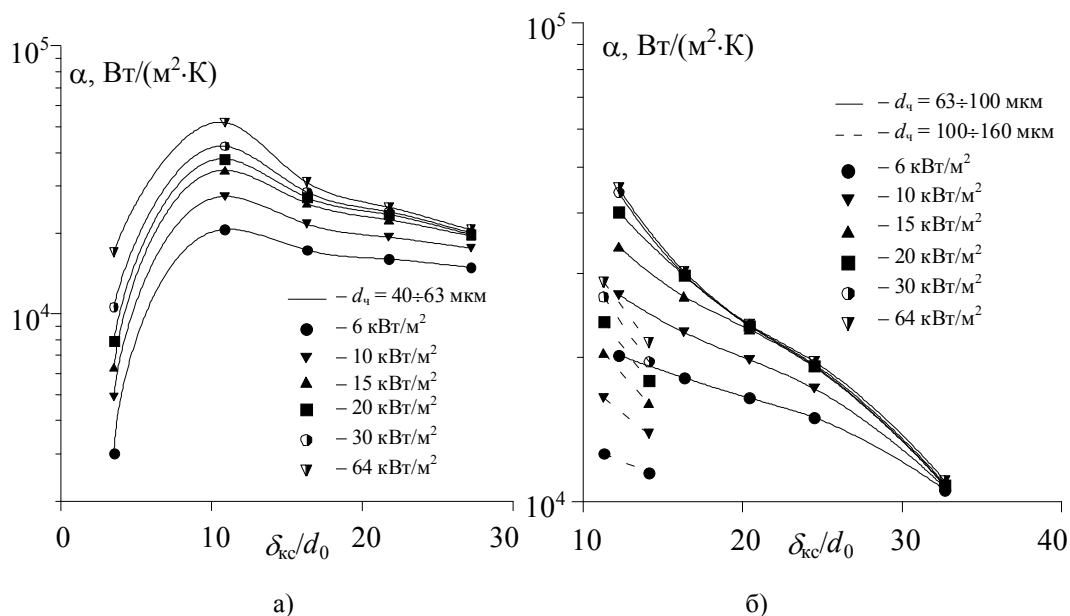


Рис. 2. Зависимость $\alpha = f(\delta_{kc}/d_0)$ для различных тепловых потоков и фракций при $T_n = 20^\circ\text{C}$: а) $d_i = 40 \div 63$ мкм; б) $d_i = 63 \div 100$ мкм, $d_i = 100 \div 160$ мкм

Поэтому, в качестве коэффициента учитывающего геометрические характеристики капиллярно-пористой структуры, в уравнении (11) можно предложить безразмерный комплекс вида:

$$Ks = \frac{\delta_{кс}}{d_0}. \quad (16)$$

Тогда уравнение (11) с учетом свойств пористого покрытия представляется возможным записать:

$$Nu = C \cdot Ks^s \cdot K^m \cdot Pr^n, \quad (17)$$

где значения C, s, m, n – находятся на основании экспериментальных данных.

Изменение значения скорости роста паровых пузырей ω'' предлагается учитывать в постоянной C , поскольку предполагается, что и для поверхности с пористой структурой значение ω'' не зависит от плотности теплового потока.

При обобщении экспериментальных данных по интенсивности теплоотдачи при кипении пропана на медных спеченных капиллярно-пористых структурах в условиях большого объема по уравнению (17) при значениях $Ks=11 \div 28$ была получена следующая критериальная зависимость:

$$Nu = 35 \cdot Ks^{-0,5} \cdot K^{0,5} \cdot Pr^{-0,2}, \quad (18)$$

или в развернутом виде

$$\frac{\alpha \cdot \bar{d}_0}{\lambda_{эф}} = 35 \cdot \left(\frac{\delta_{кс}}{\bar{d}_0} \right)^{-0,5} \cdot \left(\frac{q}{r \rho_n \omega''} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\nu}{a} \right)^{-0,2}, \quad (19)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); d_0 – средний гидравлический размер пор, м; $\lambda_{эф}$ – эффективная теплопроводность пористой структуры, Вт/(м·К); $\delta_{кс}$ – толщина капиллярной структуры, м; q – плотность теплового потока, Вт/м²; ω'' – скорость роста паровых пузырей, м/с; r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; физические свойства жидкого и парообразного пропана взяты на линии насыщения по данным [11].

Как видно из рис. 3, экспериментальные данные настоящего исследования удовлетворительно описываются уравнением (19). Поэтому полученную критериальную зависимость можно рекомендовать для оценочных и инженерных расчетов интенсивности теплоотдачи при кипении пропана в условиях большого объема.

Таблица 1

Параметры исследованных пористых структур и условия эксперимента

№ точки	Диаметр частиц, мкм	Толщина покрытия; $\delta_{кс}$, мм	Температура насыщения; T_n , °C
1	2	3	4
1	40...63	0,2	20
2			30
3			10
4			0
5		0,3	30
6			20
7			10
8			0

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
12		0,5	30
13			20
14			10
15			0
16	63...100	0,3	30
17			20
18			10
19			0
20		0,4	20
21			10
22		0,5	0
23			30
24			20
25			10
26			0
27	63...100	0,6	20
28			10
29	100...160	0,4	30
30			20
31			10
32			0
33		0,5	30
34			20
35			10
36			0
37	160...200	0,5	20

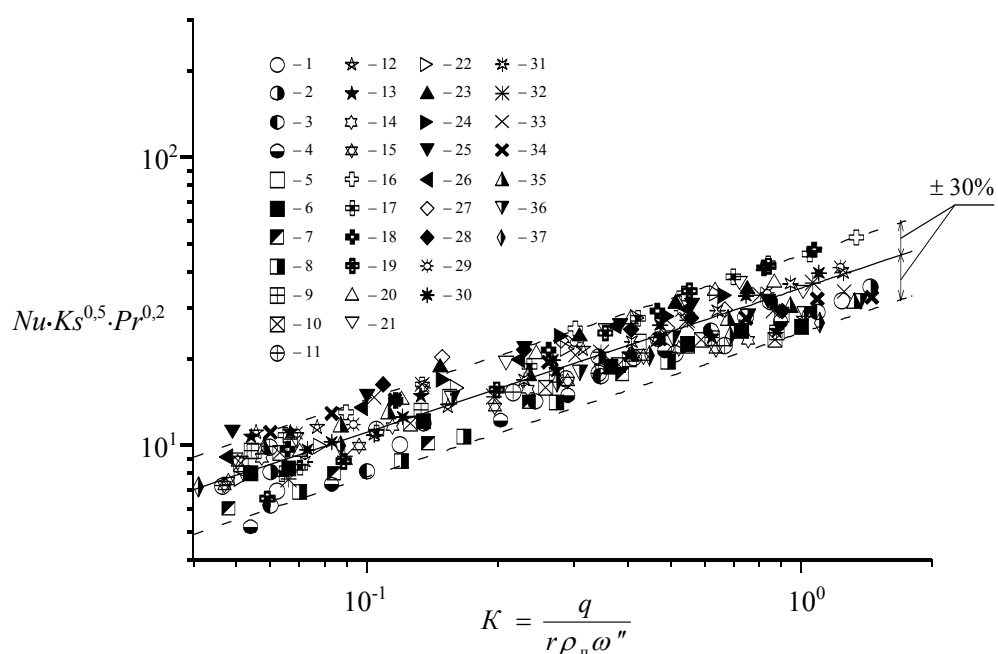


Рис. 3. Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении пропана на поверхности со спеченной капиллярно-пористой структурой (обозначения см. в табл. 1).

3. Рекомендации по применению полученных результатов

В связи со снижением использования и производства теплоносителей и хладагентов, разрушающих озоновый слой Земли, приобрела актуальность проблема их замены на экологически безопасные, при сохранении параметров эксплуатируемого оборудования. В качестве альтернативы фреонам можно предложить углеводороды, обладающие необходимыми качествами. На рис. 4. представлены экспериментальные данные различных авторов при кипении фреонов, пропана и бутана на гладкой поверхности, свидетельствующие о возможности такой замены. Как видно из рисунка коэффициенты теплоотдачи при кипении пропана при схожих условиях выше, что подтверждает возможность использования углеводородов (в частности пропана) в различных отраслях промышленности.

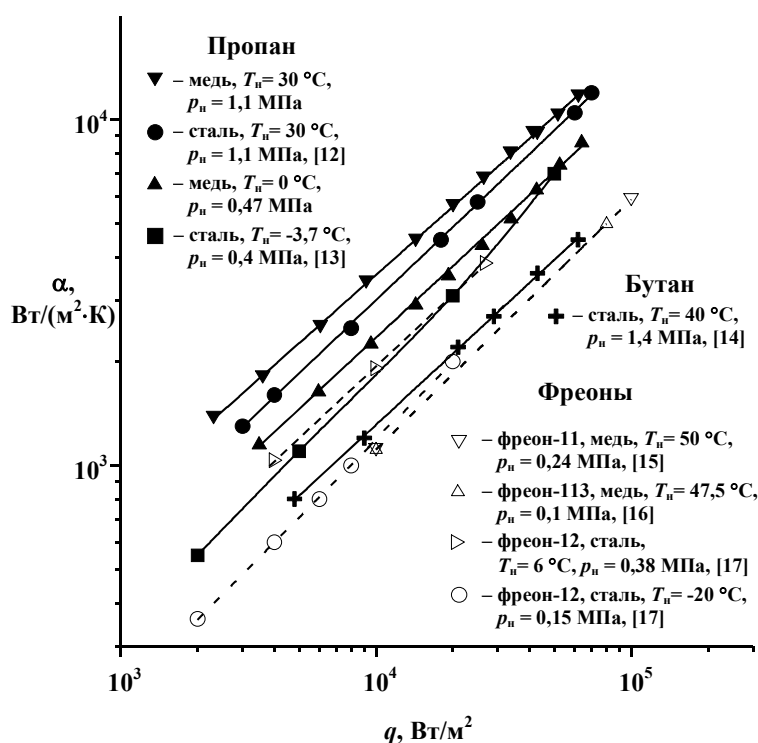


Рис. 4. Экспериментальные данные по теплоотдаче различных авторов и данной работы при кипении фреонов, пропана и бутана на гладкой поверхности

Наряду с решением экологических проблем большое значение придается разработке и внедрению энерго- и ресурсосберегающих технологий, позволяющих экономно и рационально использовать энергетические и материальные ресурсы. Одним из перспективных путей создания компактных теплообменных аппаратов является применение высокоэффективных поверхностей теплообмена. Поэтому проблема обоснованного выбора таких поверхностей является одной из актуальнейших. На рис. 5 представлены теплоотдающие характеристики наиболее эффективного из образцов ($\delta_{кс} = 0,2\text{ мм}$, $d_u = 40\text{--}63\text{ мкм}$, $\Pi = 50\text{--}55\text{ \%}$), исследованных в данной работе и экспериментальные данные других авторов на структурированных и пористых поверхностях при кипении пропана и фреонов. Как видно из рисунка, коэффициенты теплоотдачи при кипении пропана в диапазоне малых и умеренных тепловых потоков $q = 10^3\text{--}2 \cdot 10^4\text{ Вт/м}^2$ на исследованном покрытии в 1,5–2,5 раза выше, чем на стальной спеченной структуре (работа [14], кривая 3 на рис. 5). Это связано с ухудшением отвода паровой фазы при вертикальном расположении трубы и низкой теп-

лопроводностью скелета. При более высоких $q=2 \cdot 10^4 - 7 \cdot 10^4$ Вт/м² значения α сближаются, поскольку на медном покрытии из-за высокой теплопроводности происходит более быстрое «запаривание» пристенного слоя. При кипении фреонов в схожих условиях, коэффициенты теплоотдачи ниже в 1,5–3 раза на пористых покрытиях, и до 5-ти раз на структурированных поверхностях.

Таблица 2

Параметры исследованных покрытий и условия эксперимента

№	Материал образца и покрытия	Вид покрытия	Жид- кость	Температура насыщения, Т _н , °С	Давление насыщения, р _н , МПа	Лите- ратура
1	медь	спекание	пропан	30	1,1	Данная работа
2				0	0,47	
3	н. сталь			40	1,4	[14]
4	медь	Gewa-T-x		49,9	1,7	[18]
5			-3,6	0,4		
6		Thermoexel-E	F-113	47,5	0,1	[19]
7		Gewa-T				
8		High Flux				
9		спекание				
10					[16]	
11	н. сталь				[20]	
12			F-12	-20	0,15	[21]
13	медь	напыление		20	0,57	[17]
14	н. сталь		F-22		0,91	
15						

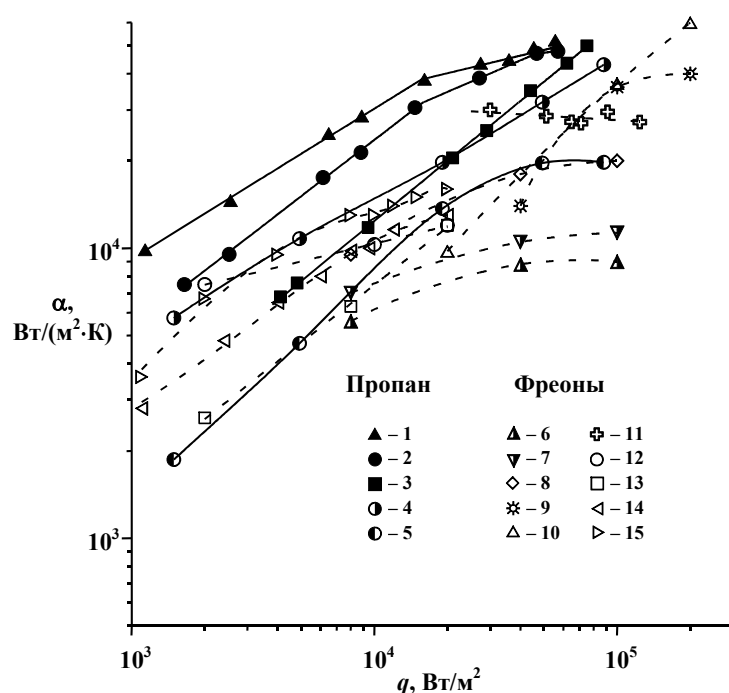


Рис. 5. Экспериментальные данные по теплоотдаче различных авторов и данной работы при кипении фреонов и пропана на пористых и структурированных поверхностях (обозначения см. табл. 2)

Выводы

1. Получено критериальное уравнение для определения интенсивности теплоотдачи при кипении пропана в большом объеме на медных спеченных пористых покрытиях, в широком диапазоне тепловых потоков и давлений насыщения, обобщающие результаты экспериментов с погрешностью $\pm 30\%$.
2. Проведенный анализ показывает перспективность применения пропана в качестве теплоносителя и хладагента в различных отраслях промышленности.
3. Использование исследованного метода интенсификации теплообмена при кипении пропана, позволит значительно улучшить экологические и экономические характеристики теплообменного оборудования.

Литература

1. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении. – Киев: Наукова думка, 1980. – 316 с.
2. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении в условиях свободной конвекции //Тр. Ин-та теплоэнергетики. – 1950. – №2. – С. 19-29.
3. Толубинский В.И. К теории теплообмена при кипении //Изв. вузов. Энергетика, 1959. – № 1. – С. 15-22.
4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1975. – 486 с.
5. Толубинский В.И., Антоненко В.А., Островский Ю.П. Изменение числа действующих центров парообразования в зависимости от высоты слоя жидкости //ИФЖ. – 1977. – Т. 32. – № 1. – С. 13-17.
6. Боришанский В.М., Жохов К.А. Отрыв пузырька от поверхности нагрева //ИФЖ. – 1968. – Т. 15. – № 4. – С. 599-604.
7. Толубинский В.И. Скорость роста паровых пузырей при кипении жидкостей //Изв.вузов. Энергетика. – 1963. – № 10. – С. 76-83.
8. Tolubinsky V.I., Ostrovsky Y.N. On the mechanism of boiling heat transfer //Int.J. Heat and Mass Transfer.– 1966. –V.9. – P. 1463-1470.
9. Перкинс А., Уэстуотер Дж. Диаметр и частота отрыва пузырей при кипении метилового спирта. – В кн.: Вопросы физики кипения. – М.: Мир, 1964. – С. 258-281.
10. Данилова Г.Н., Бельский В.К., Куприянова А.В. Кинематографическое исследование процесса парообразования фреонов. – В. кн.: Конвективная теплопередача в двухфазном и однофазном потоках. – М. – Л.: Энергия, 1964. – С. 208-221.
11. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
12. Клименко А.П., Козицкий В.И. Экспериментальное исследование теплообмена при кипении пропана //Нефтяная и газовая промышленность. – Киев. – 1967. – № 1. – С. 40–43.
13. Gorenflo D., Sokol P., Caplanis S. Pool boiling heat transfer from single plain tubes to various hydrocarbons. //Int. J. Refrig. – 1990. № 13. – P. 286–292.
14. Сиротин А.Г. Экспериментальное исследование процесса кипения углеводородных жидкостей на пористых поверхностях //Кипение и конденсация. – Рига: РПИ, 1984. – С. 20-27.
15. Накаяма В., Дайкоку Т., Накадзима Т. Влияние параметра пор и давления в системе на теплоотдачу от пористых поверхностей при пузырьковом кипении в

- большом объеме в режиме насыщения //Теплопередача. – 1982. – Т. 104. – № 2. – С. 65-72.
16. Теплообмен при кипении азота и фреона-113 на пористых металлических покрытиях /Ройзен Л.И., Рачицкий Д.Г., Рубин И.Р. и др. //ТВТ. – 1982. – Т. 20. – № 2. – С. 304-310.
 17. Дюндин В.А., Данилова Г.Н., Боришанская А.В. Теплообмен при кипении хладагентов на поверхностях с пористыми покрытиями //Теплообмен и гидродинамика. – Ленинград, 1977. – С. 15-30.
 18. Pool boiling heat transfer from plain and finned tubes to propane and propylene /Sokol P., Blein P., Gorenflo D. et al. //Heat Transfer 90: Proc. of 9th Int. Heat Transfer Conf., Jerusalem, Israel, Aug. 19-24. 1990 /The Assembly for Int. Heat Transfer Conferences. – Vol. 1. – P. 75-80.
 19. Данилова Г.Н., Тихонов А.В. Экспериментальное исследование теплообмена при кипении холодильных агентов на интенсифицированных поверхностях теплообмена //Кипение, кризисы кипения, закризисный теплообмен: Тр. Первой Российской национальной конференции по теплообмену (М., Россия, ноябрь 1994). – М.: Изд-во МЭИ, 1994. – Т. 4. – С. 91-95.
 20. Boiling heat transfer from surfaces with porous layers /N.H. Afgan, L.A. Jovic, S.A. Kovalev, V.A. Lenykov //Int. Journal of Heat and Mass Transfer. – 1985. – Vol. 28, № 2. – P. 415-422.
 21. Боришанская А.В. О теплоотдаче при кипении фреонов на поверхностях с пористыми металлическими покрытиями //Холодильная промышленность. – 1979. – № 12. – С. 15-30.

Получено 22.05.2001 г.